Etude du coefficient d'atténuation en fonction de la longueur d'onde

Objectifs expérimentaux

- Mesure de la transmission *T* d'un film en cuivre et d'un film en zircon pour le rayonnement x en fonction de la longueur d'onde λ variable entre 30 et 120 pm.
- Etude de l'influence de la longueur d'onde sur le coefficient d'atténuation μ en dehors des arêtes d'absorption.
- Vérification de la loi λ^3 pour le coefficient d'absorption τ.

Notions de base

L'atténuation du rayonnement X au passage à travers la matière est décrite par la loi de Lambert (voir expérience P6.3.2.1):

$$R = R_0 \cdot e^{-\mu x} \quad \text{(I)}$$

R_0 est ici l'intensité du rayonnement X devant l'atténuateur, *R* l'intensité derrière l'atténuateur, le coefficient d'atténuation linéaire et *x* l'épaisseur de l'atténuateur.

L'absorption et la diffusion contribuent ensemble à l'atténuation du rayonnement X. Le coefficient d'atténuation linéaire μ est donc constitué du coefficient d'absorption linéaire τ et du coefficient de diffusion linéaire σ:

$$\mu = \tau + \sigma \quad \text{(II)}$$

Ces coefficients sont proportionnels à la masse et à la densité ρ du matériau irradié, raison pour laquelle on utilise souvent ledit coefficient de masse

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho},\ \tau_m = \frac{\tau}{\rho},\ \sigma_m = \frac{\sigma}{\rho} \quad \text{(III)}$$

ou – pour les métaux purs observés ici – les coefficients atomiques ou sections efficaces

$$\mu_a = \mu_m \frac{A}{N_A},\ \tau_a = \tau_m \frac{A}{N_A},\ \sigma_a = \sigma_m \frac{A}{N_A} \quad \text{(IV)}$$

A: masse atomique relative

$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$: Nombre d'Avogadro

Comme pour l'équation (II), on a

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m \quad \text{(V)}$$

et

$$\mu_a = \tau_a + \sigma_a \quad \text{(VI).}$$

L'absorption du rayonnement X se base essentiellement sur l'ionisation des atomes qui délivrent un électron d'une couche atomique intérieure. La section efficace d'absorption τ_a dépend par conséquent fortement de l'énergie quantique $h\nu$ ou de la longueur d'onde λ du rayonnement X ainsi que de l'énergie d'excitation des atomes et donc du numéro atomique *Z*. Pour l'ionisation, l'énergie quantique du rayonnement X doit dépasser l'énergie de liaison *E* des électrons issus de la couche en question. La section efficace d'absorption devient alors très petite dès que l'énergie quantique est à peine inférieure à l'énergie de liaison. La longueur d'onde limite pour laquelle l'énergie quantique suffit encore porte le nom d'arête d'absorption (voir fig. 1).

En dehors des arêtes d'absorption, on a en bonne approximation le rapport

$$\tau_a = C \cdot \lambda^3 \cdot Z^4 \quad \text{(VII).}$$

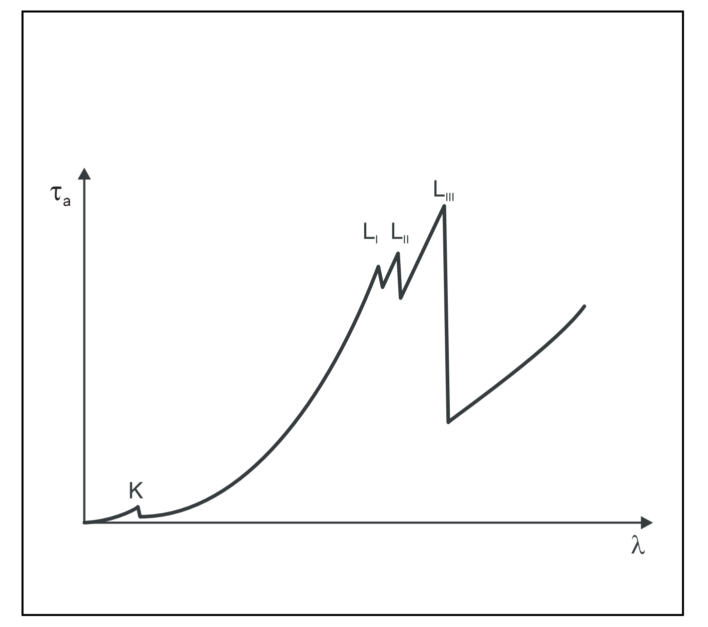


Fig. 1 Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde du rayonnement X (schéma)
K: Arête d'absorption de la couche K
L_I, L_{II}, L_{III}: Arêtes d'absorption de la couche L

0708-Ste

Matériel

1 appareil à rayons X 554 811

1 tube compteur à fenêtre
pour rayonnements α, β, γ et X 559 01

1 Lot de films d'absorption 554 832

Supplément:

1 PC avec Windows 95/98 ou Windows NT

La subordination à la longueur d'onde λ est vérifiée dans l'expérience pour deux métaux différents – donc deux numéros atomiques Z différents.

Pour l'exploitation, on profite du fait que la section de diffusion σ_a dans la gamme d'ondes λ = 35–100 pm est nettement inférieure à la section relative d'absorption et peut être approximativement évaluée par

$$\sigma_a = 0{,}2\,\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot \frac{A}{N_A} \tag{VIII}$$

D'après les équations (III) à (VIII), il résulte après quelques transformations pour la section relative d'absorption:

$$\tau_a = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{A}{N_A} - 0{,}2\,\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot \frac{A}{N_A} \tag{IX}$$

La transmission

$$T = \frac{R}{R_0} \tag{X}$$

du matériau irradié est mesurée en fonction de la longueur d'onde du rayonnement X. En appliquant la loi de Lambert

$$T = e^{-\mu x} \tag{XI}$$

le coefficient d'atténuation linéaire μ peut être calculé et d'après celui-ci, la section relative d'absorption τ_a selon l'équation (IX):

$$\tau_a = \frac{-\ln T}{\rho \cdot x} \cdot \frac{A}{N_A} - 0{,}2\,\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot \frac{A}{N_A} \tag{XII}$$

Conseils de sécurité

L'appareil à rayons X respecte les consignes relatives à la construction d'un appareillage à rayons X pour l'enseignement et d'un appareil à protection totale et est homologué en tant que tel (d'après le règlement allemand sur les rayonnements X).

Grâce aux mesures de protection et de blindage incorporées par le constructeur, le taux de dose hors de l'appareil est réduit à moins de 1 µSv/h, une valeur d'un ordre de grandeur correspondant à la dose d'irradiation naturelle.

- Avant la mise en service, s'assurer du bon état de l'appareil à rayons X et vérifier que la haute tension est bien coupée à l'ouverture des portes coulissantes (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X).
- Tenir l'appareil à rayons X à l'abri des personnes non autorisées.

Eviter une surchauffe de l'anode dans le tube à rayons X Mo.

- A la mise en marche de l'appareil à rayons X, vérifier si le ventilateur dans la partie tube fonctionne.

Le goniomètre s'ajuste exclusivement par le biais de moteurs pas à pas électriques.

- Ne pas bloquer le bras de cible et le bras de capteur du goniomètre et ne pas modifier le réglage par force.

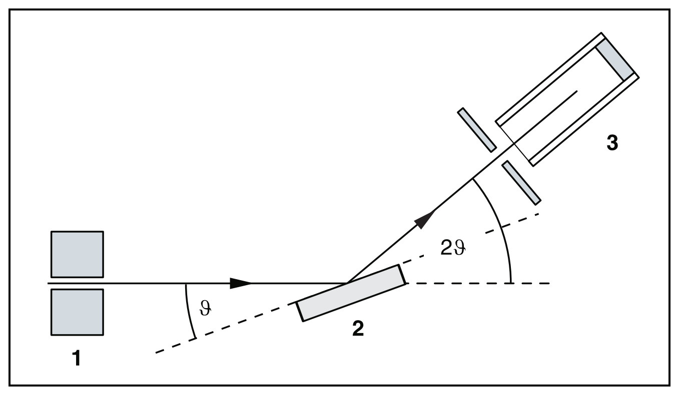


Fig. 2 Diffraction du rayonnement X sur un monocristal pour le couplage 2ϑ entre l'angle du tube compteur et l'angle de diffusion (angle de brillance)
1 collimateur, **2** monocristal, **3** tube compteur

On utilise un goniomètre avec cristal de NaCl et un tube compteur de Geiger-Müller en disposition de Bragg pour le tracé des intensités en fonction de la longueur d'onde. Le cristal et le tube compteur sont orientés dans un couplage 2ϑ par rapport au faisceau de rayons X incident; cela signifie que le tube compteur est à chaque fois tourné d'un angle deux fois plus grand que le cristal (cf. fig. 2).

Conformément à la loi de la réflexion de Bragg, la longueur d'onde

$$\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \vartheta \tag{XIII}$$

d = 282,01 pm: écartement des plans du réseau du NaCl

correspond à l'angle de diffusion ϑ dans le premier ordre de diffraction.

Montage

Réalisation de la disposition de Bragg:

Le montage est représenté sur la fig. 3. La marche à suivre est la suivante (voir aussi mode d'emploi de l'appareil à rayons X):

– Placer le collimateur dans le logement du collimateur **(a)** (faire attention à la rainure de guidage).
– Fixer le goniomètre sur les barres de guidage **(d)** de manière à avoir une distance s_1 d'environ 5 cm entre le diaphragme à fente du collimateur et le bras de cible. Enficher le câble plat **(c)** pour la commande du goniomètre.
– Enlever le capuchon protecteur du tube compteur à fenêtre, placer le tube compteur à fenêtre dans le logement du capteur **(e)** et brancher le câble du tube compteur à la douille GM-Tube.
– En déplaçant le porte-capteur **(b)**, régler une distance s_2 d'environ 5 cm entre le bras de cible et le diaphragme à fente du logement pour capteur.
– Monter le porte-cible avec le plateau pour cible.
– Desserrer la vis moletée **(g)**, poser le cristal de NaCl à plat sur le plateau pour cible **(f)**, soulever prudemment le plateau pour cible avec le cristal jusqu'à la butée et serrer la vis moletée en faisant bien attention (visser bien dans l'axe).
– Eventuellement ajuster la position zéro du goniomètre (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X).

N.B.:

Les cristaux de NaCl sont hygroscopiques et fragiles:

Ranger le cristal dans un endroit aussi sec que possible, éviter si possible toute sollicitation mécanique sur le cristal, ne s'emparer du cristal que par les fronts.

Si le taux de comptage est trop faible, la distance s_2 entre la cible et le capteur peut être légèrement réduite sans pour autant finir par être trop petite sous peine d'avoir une résolution angulaire du goniomètre qui ne suffirait plus pour la séparation des raies caractéristiques K_α et K_β.

Préparation de l'acquisition des valeurs mesurées avec le PC:

– Relier la sortie RS232 et le port série du PC (en principe COM1 ou COM2) via le câble V24 à 9 pôles (livré avec l'appareil à rayons X).
– Eventuellement installer le programme «Appareil à rayons X» sous Windows 95/98/NT (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X) puis sélectionner la langue désirée.

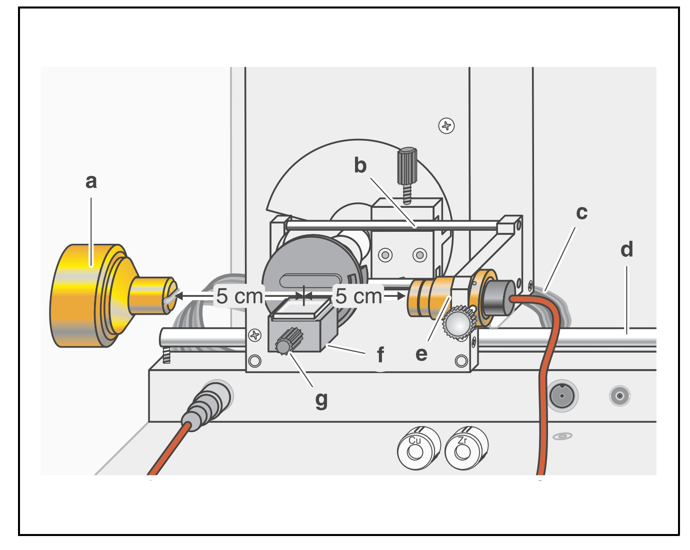


Fig. 3 Montage expérimental pour l'étude de l'influence de la longueur d'onde sur le coefficient d'atténuation

Réalisation

– Lancer le programme «Appareil à rayons X», vérifier que l'appareil à rayons X soit bien branché et éventuellement effacer les données de mesure existantes avec le bouton [icône] ou la touche F4.
– Sélectionner une haute tension du tube U = 30,0 kV, un courant d'émission I = 1,00 mA et un pas angulaire $\Delta\beta$ = 0,1°.

Pour U = 30 kV, la longueur d'onde limite du rayonnement de freinage s'élève à λ_{min} = 41,3 pm (voir par ex. l'expérience P6.3.3.3). Cette valeur correspond à un angle de diffraction de 4,19° dans le premier ordre de diffraction et de 8,42° dans le deuxième ordre de diffraction.

– Activer le bouton-poussoir Coupled pour le couplage 2ϑ de la cible et du capteur et régler la valeur limite inférieure de l'angle de la cible sur 4,2°, la valeur limite supérieure sur 8,3°.
– Sélectionner Δt = 5 s comme temps de mesure par pas angulaire.
– Lancer la mesure et la transmission des données vers le PC avec le bouton-poussoir SCAN.
– Une fois le balayage terminé, augmenter le temps de mesure par pas angulaire à Δt = 10 s, monter le film en Cu du lot de films d'absorption (554 832) sur le logement pour capteur **(e)** du goniomètre et lancer une autre mesure en activant le bouton-poussoir SCAN.
– Pour finir, remplacer le film en Cu par celui en Zr et lancer une troisième mesure.
– Une fois les mesures terminées, enregistrer les séries de mesures sous un nom approprié avec le bouton [icône] ou la touche F2.
– Pour la représentation des données de mesure en fonction de la longueur d'onde λ, activer la fenêtre de dialogue «Réglages» avec le bouton [icône] ou la touche F5 et le bouton «Inscrire NaCl» sous «Cristal» en cliquant avec la souris.

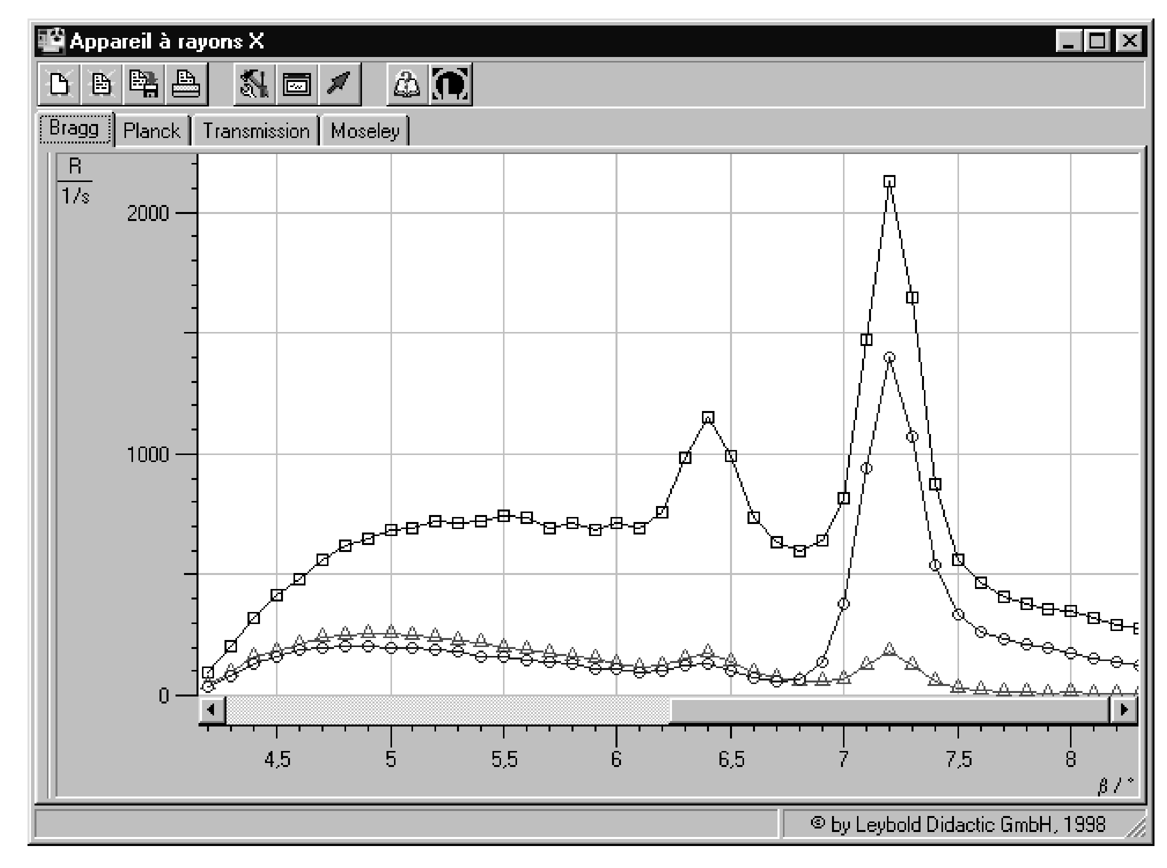


Fig. 4 Spectres de diffraction du rayonnement X ▲ avec les raies caractéristiques de l’anode au molybdène dans la gamme d’ondes allant de 40 à 80 pm (*U* = 30 kV)
Carrés: sans atténuation
Triangles: atténuation dans le film en cuivre
Cercles: atténuation dans le film en zircon

Fig. 5 Transmission *T* dans la gamme d’ondes allant de 40 à 80 pm
Triangles: atténuation dans le film en cuivre
Cercles: atténuation dans le film en zircon
▼



Exemple de mesure

Voir Fig. 4

Exploitation

a) Calcul de la transmission *T:*

– Générer les spectres de transmission pour le film en cuivre et le film en zircon à partir des spectres de diffraction (voir fig. 4) dans le programme Appareil à rayons X en cliquant le registre «Transmission» selon (X) (voir fig. 5).

b) Calcul de la section relative d'absorption τ_a**:**

– Pour copier les données dans le presse-papiers de Windows, cliquer avec le bouton droit de la souris sur la fenêtre tableau et sélectionner le point du menu «Copier tableau».
– Insérer des données du presse-papiers de Windows avec les trois colonnes λ, *T*(Cu) et *T*(Zr) dans un programme d'évaluation (par ex. un tableur).
– Calculer la section relative d'absorption τ_a pour les deux films avec les paramètres réunis dans le tableau 1 par application de (XII) (voir fig. 6).

Tab. 1: Paramètres des films utilisés

Elément	Z	$\frac{\rho}{g \cdot cm^{-3}}$	$\frac{x}{cm}$	$\frac{A}{g \cdot mol^{-1}}$
Cu	29	8,92	0,007	63,55
Zr	40	6,49	0,005	91,22

c) Vérification de la loi λ^3**:**

– Calculer les termes ln (τ_a /10^{-24} cm^2) et ln (λ/pm) et représenter la subordination à la longueur d'ondes de la section relative d'absorption sous la forme ln τ_a = f (ln λ) (voir fig. 7).
– Modelliser les droites de régression à intervalles appropriés.

Résultat

La section relative d'absorption atomique du cuivre augmente de manière monotone dans la gamme d'ondes allant de 40 à 80 pm. Par contre, on observe pour le zircon un changement soudain de la section relative d'absorption (arête d'absorption de la couche K). Dans la pratique, on profite de cette propriété pour la monochromatisation approximative du rayonnement X d'une anode au molybdène, c.-à-d. la suppression du spectre continu du rayonnement de freinage et de la raie K_β (voir fig. 4).

La section relative d'absorption peut être représentée sous la forme

$\ln \tau_a = A \cdot \ln \lambda + B$

dans des intervalles appropriés en dehors des arêtes d'absorption. La pente de la droite *A* a environ la valeur 3, on a donc approximativement la loi λ^3:

En dehors des arêtes d'absorption, la subordination à la longueur d'onde de la section relative d'absorption atomique se décrit approximativement par le rapport

$\tau_a = C_1 \lambda^3$.

Fig. 6 Section relative d'absorption τ_a dans la gamme d'ondes allant de 40 à 80 pm Triangles: cuivre (Cu)
Cercles: zircon (Zr)

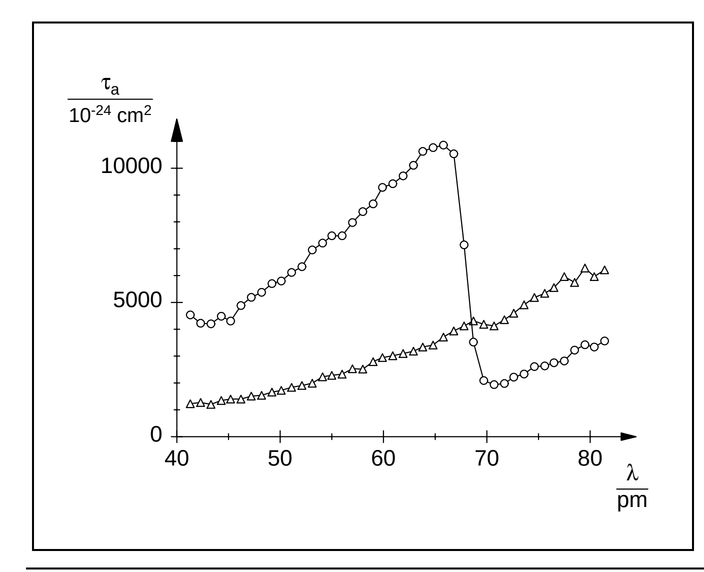


Fig. 7 Section relative d'absorption τ_a dans la représentation ln τ_a en fonction de ln λ
Triangles: cuivre (Cu)
Cercles: zircon (Zr)
Lignes: droites de régression
Pente de la droite: 2,7 (Cu) et 2,5 (Zr)

